用于不稳定核性质研究的激光共振电离技术

胡晗睿　郭洋帆　杨晓菲　白世伟
（北京大学物理学院和核物理与核技术国家重点实验室　北京　100871）

摘要　不稳定原子核的基本性质反映了核的内在结构和有效相互作用，可用于研究不稳定核的奇特结构。激光核谱技术通过测量核外电子光谱的超精细结构和同位素移位，可以核模型无关地提取原子核的多个基本性质，是研究不稳定核性质和结构的有力工具之一。多步激光共振电离方法是测量原子或离子超精细结构和同位素移位的方法之一。基于此，国际上发展了多种共振电离谱实验技术，用于放射性核束装置上开展不稳定核基本性质和结构研究。本文首先介绍了激光共振电离方法，以及由此发展的各种共振电离激光谱实验技术。随后详细讨论了近十年来刚发展起来的共线共振电离谱技术。此技术可同时实现超精细结构谱的高分辨和高灵敏度测量，正在核素版图大质量范围内的不稳定核性质和结构研究中发挥重要作用。最后分析了用于国内放射性核束装置的共振电离激光谱技术的发展现状及应用前景。

关键词　不稳定原子核，超精细结构，激光共振电离，激光谱技术
中图分类号　TL99
DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080017
关联视频 DOI: 10.12351/ks.2208.0917



Laser resonance ionization techniques for studying the properties of unstable nuclei

HU Hanrui　GUO Yangfan　YANG Xiaofei　BAI Shiwei
(*School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract　The fundamental properties of unstable nuclei are highly related to the nuclear structure and effective nucleon-nucleon interaction, and they can be used to study various exotic structures of unstable nuclei. Laser spectroscopy is a powerful tool used to study nuclear properties and structure by probing the hyperfine structure and isotope shift of the corresponding atoms or ions, from which the nuclear properties can be extracted in a nuclear model-independent manner. Multi-step laser resonance ionization spectroscopy (RIS) can be used to measure the atomic or ionic hyperfine structure. Based on this approach, various experimental techniques have been developed at radioactive ion beam (RIB) facilities worldwide to study the nuclear properties and structure of atomic nuclei. In this paper, the RIS approaches and relevant RIS experimental techniques are first introduced. Subsequently, the recently-developed collinear resonance ionization spectroscopy experimental technique, which can be used to measure the

国家自然科学基金(No.12027809, No.U1967201, No.11961141003)、国家重点研发计划(No.2022YFA1604800)和北京大学核物理与核技术国家重点实验室(No.NPT2020KFY17)资助
第一作者：胡晗睿，男，1999年出生，2021年毕业于兰州大学，现为博士研究生，研究领域为粒子物理与原子核物理
通信作者：杨晓菲，E-mail：xiaofei.yang@pku.edu.cn
收稿日期：2023-02-19，修回日期：2023-04-03
Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12027809, No.U1967201, No.11961141003), National Key R&D Program of China (No. 2022YFA1604800) and School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University (No. NPT2020KFY17)
First author: HU Hanrui, male, born in 1999, graduated from Lanzhou University in 2021, doctoral student, focusing on particle physics and nuclear physics
Corresponding author: YANG Xiaofei, E-mail: xiaofei.yang@pku.edu.cn
Received date: 2023-02-19, revised date: 2023-04-03

atomic or ionic hyperfine structure spectrum with a high-resolution and high sensitivity and plays an important role in the study of the nuclear properties and structure of unstable nuclei in the large mass regions of nuclear charts, is discussed in detail. Finally, the development status of RIS and its application in domestic RIB facilities are discussed.

Key words Unstable nuclei, Hyperfine structure, Laser resonance ionization, Laser spectroscopy technique

不稳定原子核大多处于核素版图尚未开发的区域，展现出丰富的结构现象，如晕结构、壳演化以及形状共存等，相关测量不断挑战原有的核结构图像和理论模型。因此，针对不稳定核的研究是国际上核物理基础研究的前沿热点之一[1-4]。随着国际范围内的放射性核束(Radioactive Ion Beam，RIB)装置的升级和下一代RIB装置的发展，如瑞士欧洲核子中心(European Organization for Nuclear，CERN)的ISOLDE(Isotope Separator On-Line DEvice)[5]、日本理化学研究所(RIkagaku KENkyusho/Institute of Physical and Chemical Research，RIKEN)的RIBF(Radioactive Isotope Beam Factory)[6]、美国密歇根州立大学的FRIB(Facility for Rare Isotope Beams)[7]、德国重离子研究中心(GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH，GSI)的FAIR(Facility for Antiproton and Ion Research)[8]、中国近代物理研究所的HIAF(High Intensity heavy-ion Accelerator Facility)[9]等，更多远离β稳定线的丰中子/丰质子核素将被产生，为进一步通过各种实验手段研究不稳定核性质和奇特结构提供了重要条件。

目前，有多种研究不稳定核的实验探测方法和技术，典型的如核反应、核衰变和基本性质测量等，在国际各RIB装置上广泛应用[1]。不同实验探测技术对不稳定核的研究也依赖于产生放射性核束的方式。RIB装置产生不稳定核束的方式主要分为两类：在线同位素分离法(Isotope Separator On-Line，ISOL)和弹核碎裂法(Projectile Fragmentation，PF)[2]。ISOL方法是用轻粒子(如p，D等)束轰击厚靶发生核反应，反应产物在离子源中被电离后提取并静电加速，形成几十keV的不稳定核束。PF方法利用高能重离子束(几十或几百MeV·u^{-1})轰击薄靶发生弹核碎裂反应，产生高能的放射性核束。

激光核谱技术是测量不稳定原子核基本性质的有力工具之一[10-12]，主要是针对低能放射性核束的高精度测量，因此，大多数应用在ISOL型放射性核束装置上[13-14]。激光核谱技术通过测量不稳定核的原子、离子或分子的超精细结构谱，可以核模型无关地精确提取原子核的自旋、磁矩、电四极矩以及电荷半径等基本性质，已经在不稳定核性质和奇特结构研究中发挥着重要作用[2,11]。激光核谱技术主要通过激光诱导荧光和激光共振电离两种方法来测量原子、离子或分子的超精细结构谱。基于这两类方法，国际上发展了多种激光核谱实验技术，典型的有基于荧光探测的共线激光谱技术和基于激光共振电离的在源激光谱技术。其中共线激光谱是在激光束和放射性核束共线前提下，通过多普勒调谐法共振激发离子或原子后探测退激荧光来获得待测离子或原子的超精细结构谱[2,15]。此方法有效压制了多普勒展宽，可以实现超精细结构谱的高分辨测量，因此可以用于核素版图中各质量区不稳定核的研究[2]。而采用激光共振电离的在源激光谱具有更高的探测灵敏度，但由于受到多普勒展宽或碰撞展宽的限制，其分辨率较低，很难测量超精细结构分裂较小的轻质量核区原子的超精细结构谱，目前主要应用于重质量核区原子核性质的研究[2]。激光共振电离技术不仅可以用于不稳定核的性质和结构的前沿基础研究，还有多方面的应用潜力，如激光离子源[16]、医用同位素生产[17]等。近年来新发展的结合共线技术的共线共振电离谱方法取得突破性进展，同时实现了不稳定核的高分辨和高灵敏度测量，正在核素版图大质量范围内不稳定核性质和结构研究中发挥着重要作用[18-19]。近期，此方法也首次成功应用于含不稳定核的放射性分子谱测量，为核结构、核天体和基本对称性等研究提供了新的途径和机遇[20-21]。

本文主要聚焦于激光共振电离方法及其应用。文章将从激光共振电离的原理出发，详细介绍国际上已经发展的多类共振电离激光谱实验技术，如热腔在源共振电离谱、在线气室与在线喷注共振电离谱、辐射探测共振电离谱以及共线共振电离谱技术等。文章最后将结合国内激光核谱技术的发展现状，讨论在国内现有和下一代放射性核束装置上的应用前景。

1 激光共振电离的基本原理

激光共振电离法的基本原理如图1所示，即利用多步激光将原子核外的电子逐步共振激发并电离。图1同时给出了激光共振电离的三种常用方式：非共振电离、共振电离与场电离[2]。其中，非共振电离的最后一步是利用固定频率的高功率激光将电子激发到电离势以上。共振电离是通过频率连续可调的多步激光将电子共振激发到自电离态。场电

离是通过多步激光将原子共振激发到里德堡态形成里德堡原子，处于里德堡态的原子很容易被静电场电离或热电离。这是由于里德堡原子中存在距离原子实很远的结合松散的价电子(极低的结合能)，很容易被碰撞或者受外场扰动而电离。实验上通过直接探测被电离的离子、或探测电离后离子的衰变产物、或采用高灵敏度的离子阱探测电离的离子，与共振激发的激光频率的关系(如图1中第一步激光的频率 v_1)来获得超精细结构谱。

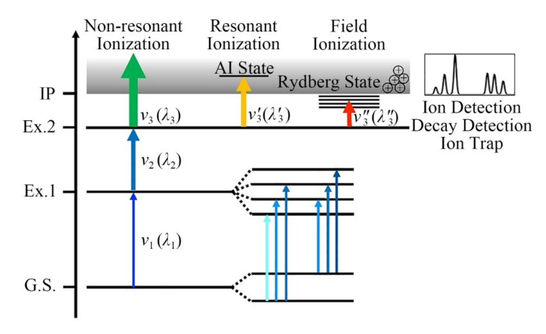


图1 激光共振电离的原理和三种测量方式：非共振电离、共振电离和场电离

Fig.1 Sketch of laser resonance ionization and the corresponding schemes, including non-resonant ionization, resonant ionization, and field ionization

实际上最常用的方法还是非共振电离，这是由于并非所有待测元素都可找到合适的自电离态。但由于非共振电离的最后一步需要高功率激光来实现高效率电离，强激光会直接电离由于碰撞激发已处于高激发态的待测原子或者杂质原子，造成大量探测本底，极大地影响实验测量超精细结构谱的灵敏度。场电离被认为是进一步提高实验探测灵敏度的方式之一。图2给出共振电离激光谱实验中常用的两种场电离模式。其中图2(a)描述了几十keV的里德堡原子束在进入一高电场时，感受到突然增大的电场强度(大的电场梯度)后，被电离成离子[22]。图2(b)中则是指在热腔的在源共振电离谱技术中，处于里德堡态的原子被碰撞电离的示意图[23]。

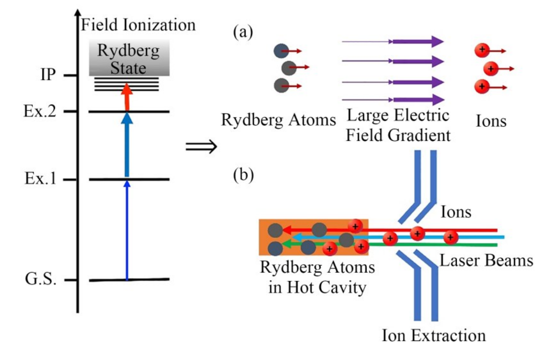


图2 场电离原理以及两种场电离方式的示意图 (a) 电场电离示意图，(b) 热电离示意图

Fig.2 Schematic of the two field ionization approaches (a) Electric field ionization, (b) Thermal ionization

2 在源型共振电离激光实验技术

激光共振电离方法的高效率和高元素选择性首先促进了ISOL型放射性核束装置上激光离子源的发展。这种离子源在20世纪80年代最早在俄罗斯的IRIS (Investigation of Radioactive Isotopes on Synchrocyclotron)放射性核束装置上实现，产生了Yb($Z=70$)、Nd($Z=60$)和Ho($Z=67$)等放射性同位素[24]。不久之后，此方法很快就被应用到CERN的ISOLDE装置RILIS(Resonance Ionization Laser Ion Source)[25]和加拿大粒子与核物理国家实验室(Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics，TRIUMF)的ISAC (Isotope Separation and ACceleration)装置TRILIS(TRIUMF Resonance Ionization Laser Ion Source)[26]。同一时期，结合反应靶源与共振电离方法的激光谱技术被直接用于测量放射性核束对应原子的超精细结构谱，从而研究其基本性质和结构[2,27]。发展至今，此方法已经能够实现对产额远低于1 pps(particles per second)的不稳定原子核的基本性质和结构研究[28−29]。然而，结合反应靶源的共振电离谱(Resonance Ionization Spectroscopy，RIS)技术测量的谱线分辨率受限于离子源的环境和条件(如温度、压力等)，通常在GHz以上[30]。目前，国际上利用不同的放射性核素反应靶源发展的在源型共振电离激光谱技术有热腔在源(Hot-cavity in-source)共振电离谱，在线气室(In-gas-cell)与在线喷注(In-gas-jet)共振电离谱和辐射探测共振电离谱(RAdiation Detected Resonance Ionization Spectroscopy，RADRIS)。图3定性给出了几种在源型共振电离谱技术的探测灵敏度和分辨率，可以看出，分辨率均在GHz以上，灵敏度均可实现低于10 pps。值得一提的是，这种在源激光谱往往需要和高灵敏度的探测方法(如衰变粒子探测、高灵敏度离子阱探测)结合，才能实现更高灵敏度(低于1 pps)的超精细结构谱测量。下文将举例详细介绍上述几类在源型共振电离谱技术。

2.1 热腔在源共振电离谱

热腔在源共振电离谱技术最早由Alkhazov等在ISOL型放射性核束装置IRIS的激光离子源基础上发展起来，实现了对丰质子 $^{154-156}$Yb同位素的超精细结构谱的测量，并验证了此方法可以测量产额低至1~10 pps的核素[24,31]。目前，此热腔在源共振电离谱技术已广泛应用于ISOL型放射性核束装置上。ISOL装置通过高能轻离子(如质子)撞击厚靶发生核反应。反应产物通常被阻停在厚靶内，当厚靶被

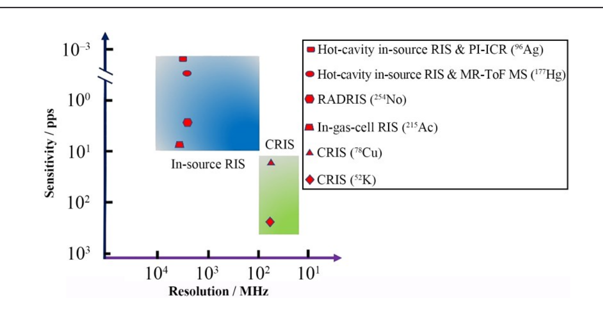


图3　几种共振电离谱技术灵敏度和分辨率的对比图
Fig.3　Comparison of the sensitivity and resolution achieved *via* different RIS techniques

加热到2 000 K以上时，反应产物可从厚靶中扩散出来并进入离子源。在离子源内，实验感兴趣的反应产物对应的原子被多步激光共振电离。产生的离子经提取和加速，然后经质量分离后被探测(文献[27]中图1)。通过测量被电离的离子计数与激光频率的关系就可得到待测核原子的超精细结构谱。在2 000 K高温下，热运动原子的传输时间会在100 μs量级。因此，为了提高离子束与激光束的占空比，用于共振电离的多步脉冲激光的重复频率一般为10 kHz甚至更高[2]。在源共振电离谱测量的超精细结构谱的分辨率会受到多普勒展宽和压制展宽的影响，一般为GHz的量级，因此目前主要用于重核区超精细结构分裂较大的核素研究[32]。

早期的热腔在源共振电离谱主要采用法拉第杯或离子探测器来测量超精细结构谱[27]。针对越来越多产额更低且伴随大量同量异位素杂质的核素的测量，在源共振电离谱技术结合了探测目标离子衰变产物的衰变探测，或者结合高灵敏度的离子阱技术的离子探测，大大提高了实验的测量灵敏度。例如，在CERN的ISOLDE放射性核束装置上，结合多反射飞行时间质谱(Multi-Reflection Time-of-Flight Mass Spectrometer，MR-ToF MS)的在源共振电离谱已经实现了对产额为几个离子/分钟的^{177}Hg($Z=80$)核素电荷半径的测量[28]；在芬兰于韦斯屈莱大学的IGISOL(Ion Guide Isotope Separator On-Line)装置上，结合位置灵敏的潘宁阱质谱PI-ICR(Phase-Imaging Ion-Cyclotron Resonance)的在源共振电离谱实现了对产额为0.005 pps的^{96}Ag($Z=47$)核素电荷半径的测量[29]。

为了提高热腔在源共振电离谱技术测量的谱线分辨率，新的技术也在不断地发展，如近期发展的垂直照射激光离子阱(Perpendicularly Illuminated Laser Ion Source and Trap，PI-LIST)[33−34]。其中，LIST技术发展的最初目的是提高热腔离子源产生束流的纯度，即在热腔的提取口处安装一个带正电的排斥电极，来抑制上游产生的正离子，从而解决由于同量异位素杂质而导致的选择性较差的问题[35]。这种技术已经在CERN-ISOLDE装置上应用，对表面电离同量异位素杂质的抑制能力提高了1 000倍以上[36]。在LIST的基础上发展的PI-LIST技术则是通过激光准直于离子源入射与原子作用的方式来抑制多普勒展宽，从而提高谱线的分辨率。此技术首先是在德国美因兹大学的RISIKO(Resonance Ionization Spectroscopy in KOllinear Geometry)离线设备上发展和运行，实现了对$^{97-99}$Tc($Z=43$)和$^{143-147}$Pm($Z=61$)等长寿命核素原子超精细结谱的高分辨(FWHM(Full Width at Half Maximum) ~100 MHz)测量[33−34]。但是，垂直入射的激光与原子相互作用的几何截面也显著降低，从而降低了共振电离效率。

2.2　在线气室与在线喷注共振电离谱技术

20世纪80年代，比利时鲁汶大学提出并发展了在线气室共振电离谱技术[37−40]，并用于LISOL(Leuven Isotope Separator On-Line)放射性核束装置[41]。以鲁汶大学在线气室共振电离谱测量^{215}Ac($Z=89$)核素为例[42]，利用^{22}Ne或^{20}Ne初级束轰击^{197}Au靶发生融合蒸发反应。反应产生的^{215}Ac^{+}离子在充有氩气的气室中被中性化后，^{215}Ac原子随着气流进入电离室区，未被中性化的^{215}Ac^{+}离子通过静电偏转电极筛除掉。^{215}Ac原子被多步激光共振电离，离子经射频离子导向器和质量分离器后，其衰变的α粒子被探测器探测，从而得到^{215}Ac原子的超精细结构谱。虽然与缓冲气体碰撞产生的能量离散导致^{215}Ac原子超精细结构谱的谱线宽度为5.8 GHz，但在线气室共振电离谱实现了对产额仅有8.3离子/s的^{215}Ac核素的高灵敏度测量。这种技术目前已经在多个RIB装置上发展和应用，如芬兰于韦斯屈莱大学的IGISOL[43]，RIKEN-RIBF的KISS(KEK Isotope Separation System)[44−45]等。

为了进一步提高在线气室共振电离谱技术测量超精细结构谱的谱线分辨率，鲁汶大学团队近几年发展了在线喷注共振电离谱技术[46−47](参考文献[42]中图1)，大大提高了实验测量的谱线分辨率。在此技术中，待测原子在共振电离区通过拉伐尔喷管(de Laval nozzle)高速喷出气室形成准直超声速气体流，从而提供一个低温低压的准自由碰撞的环境，大大降低了碰撞和温度导致的能量离散。待测原子在此环境中被垂直入射激光共振电离，实现不稳定核原子超精细结构谱的高分辨测量。此技术的首次在线实验实现了对不稳定^{215}Ac核素的高分辨测量(FWHM：394 MHz)，比在线气室共振电离谱技术测量的谱线分辨率提高了近15倍[42]。此高分辨

高灵敏度的在线喷注共振电离谱技术也将被应用到法国GANIL-SPIRAL2的S^3低能终端（S^3 Low-Energy Branch，S^3-LEB）[48]和德国GSI的重离子反应产物分离器（Separator for Heavy Ion reaction Products，SHIP）[49]终端上。

2.3　辐射探测共振电离谱技术

超重元素（Z≥100）对应的不稳定原子核的激光谱实验可为原子理论的检验和超重区原子核结构研究提供重要信息。这些超重核素的产额往往很低，例如在德国GSI的放射性核束装置SHIP上，通过融合蒸发反应产生的超重核素的产额一般为几个pps[50]。20世纪90年代，在GSI发展的辐射探测共振电离谱技术，实现了对重核区不稳定核^{208}Tl（Z＝81）的磁矩和电荷半径测量[51]。近年来，为了开展超重核的激光谱研究，GSI的实验团队优化发展了辐射探测共振电离谱技术，已经开展了对^{155}Yb核素的高效率（1%）测量[50]，并最终实现了对超重元素No（Z＝102）同位素的研究[52]。

如图4所示，通过融合蒸发反应产生的放射性重核素（如^{252,254}No），经入射窗进入缓冲气室中。在此缓冲气体阻停池中，大量反应产物保持正电荷状态。这些正离子在钽灯丝上累积并被中和为原子。通过加热钽灯丝至1 350 K，使被吸附的^{252,254}No原子从灯丝中蒸发。蒸发出来的原子被激光共振电离后被提取电极迅速引导到α探测器中。通过测量待测核素衰变α粒子计数与共振激发的激光频率的关系就可以获得^{252,254}No原子的超精细结构谱。通过此辐射探测共振电离谱技术，GSI的实验团队在国际上首次实现了对超重^{252,254}No核素原子超精细结构谱的高效率测量（^{252}No的总效率为3.3(1.0)%，^{254}No为6.4(1.0)%）。其中^{254}No的产额仅有4 pps，测量的谱线展宽约为4 GHz[52−53]。这是迄今为止通过激光谱技术研究的最重元素。此实验中，也首次精确测定了No元素的电离势（6.626 21±0.000 05）eV[52,54]。这些测量为未来的超重原子理论工作提供了重要的实验数据，并为激光谱测量更重元素的光谱信息和核结构信息奠定了基础[55]。

3　共线共振电离谱技术

如上所述，在源共振电离激光谱方法由于其受限的分辨率，主要用于重核区不稳定核性质和结构研究。对于大量轻质量区和中质量区核素研究，需要高分辨率的激光谱技术。通常能实现对不稳定核高分辨测量的激光谱方法有原子/离子阱和共线激光谱[2]。其中，原子/离子阱技术的应用范围与元素

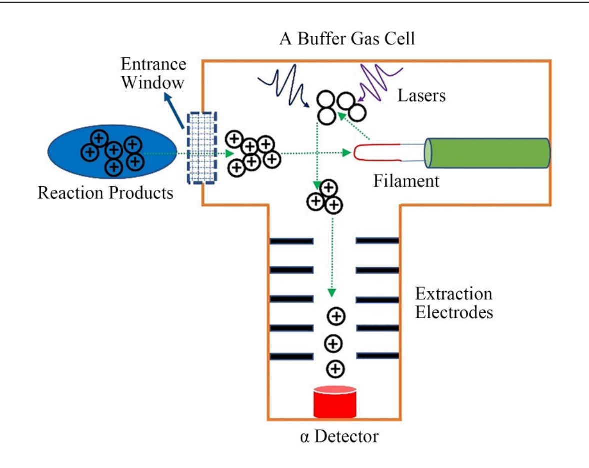


图4　RADRIS实验装置示意图
带正号的圆圈为正离子，不带正号的圆圈为原子，绿色箭头为RADRIS上一系列的反应以及探测过程
Fig.4　Schematic of the RADRIS experimental setup.
The circle with a plus sign denotes the positive ion while that without a plus sign denotes the atom, and the series of reaction and detection processes is highlighted using the green arrows.

种类有关，大多只能应用于碱金属元素和惰性气体元素。而共线激光谱采用激光与高速（几十keV）原子或离子束共线的方式，可以大大减小能量离散带来的多普勒展宽。具体来说，有确定能量离散δE的离子被加速到能量后，离子速度不确定度为$\delta v = \delta E/\sqrt{2mE}$，因此带来的多普勒展宽为：

$$\delta v = v_0 \frac{\delta E}{\sqrt{2Emc^2}} \tag{1}$$

式中：v_0为跃迁频率；m为离子质量。可见，随着离子束能量E的增大，多普勒展宽δv减小。当离子的能量为30~60 keV时，由离子能量离散造成的多普勒展宽可降至几十MHz，与原子跃迁的自然展宽处于同一量级。基于此共线技术发展的典型共线激光谱，通常采用激光诱导荧光法，因此测量灵敏度会受到激光散射光子造成的大量本底计数限制，常用于产额为10^3~10^4 pps的不稳定核素的研究。

近些年发展的共线共振电离谱（Collinear Resonance Ionization Spectroscopy，CRIS）技术，在离子和激光共线基础上采用共振电离的方式，已经同时实现了对不稳定原子核的高分辨和高灵敏度的测量[18−19]。CRIS思想最早于1982年由Kudriavtsev等[56]提出，最初设想是为了测量超低丰度的长寿命稀有放射性核素（如^{26}Al（Z＝13）：$T_{1/2}$=7.4×10^5 a，相对自然丰度为10^{-14}）。直到1991年，Schulz等[57]在CERN-ISOLDE装置上通过在线实验验证了此方法的可行性。实验采用共线的两步激光将^{157,159,175}Yb等核素对应的原子激发到里德堡态并通过场电离的方式测量了超精细结构谱，进而得到^{157,159,175}Yb等核素的基本性质。此实验采用的是连续放射性束，实

验测量的总探测效率仅为0.001%。这主要是由连续束流与脉冲激光束之间的低占空比导致的。为了避免占空比损失，基于射频四极冷却聚束器(RadioFrequency Quadrupole cooler and buncher，RFQ)的束流脉冲化技术发展起来后[58]，Flanagan等[59−60]利用脉冲的稳定^{27}Al束开展了CRIS技术的离线验证实验，达到的实验探测效率约为3%。随后，Flanagan等[61]成功将此CRIS技术应用于CERN-ISOLDE装置上开展不稳定核性质和结构研究。

图5是在CERN-ISOLDE发展的国际首个针对不稳定核研究的CRIS实验装置的示意图[61]。ISOLDE装置产生的能量为30~60 keV放射性核束，经质量分离后在RFQ[62]中被冷却、聚集和释放，实现放射性束的脉冲化。脉冲化离子束经过静电偏转进入CRIS实验终端后，首先在充满K或Na蒸汽的电荷交换室中被中性化。未被中性化的离子经静电偏转电极去除，中性化的脉冲原子束经差分抽气区进入相互作用区，并在该区域与多步脉冲激光在空间上重叠、时序上匹配，以实现原子的共振电离。相互作用区保持在超高真空(10^{-7}~10^{-8} Pa)状态，以尽可能减少原子与杂散气体碰撞电离带来的本底。被激光共振电离后的离子经静电偏转后进入探测器被收集，最终获得待测原子的超精细结构谱。

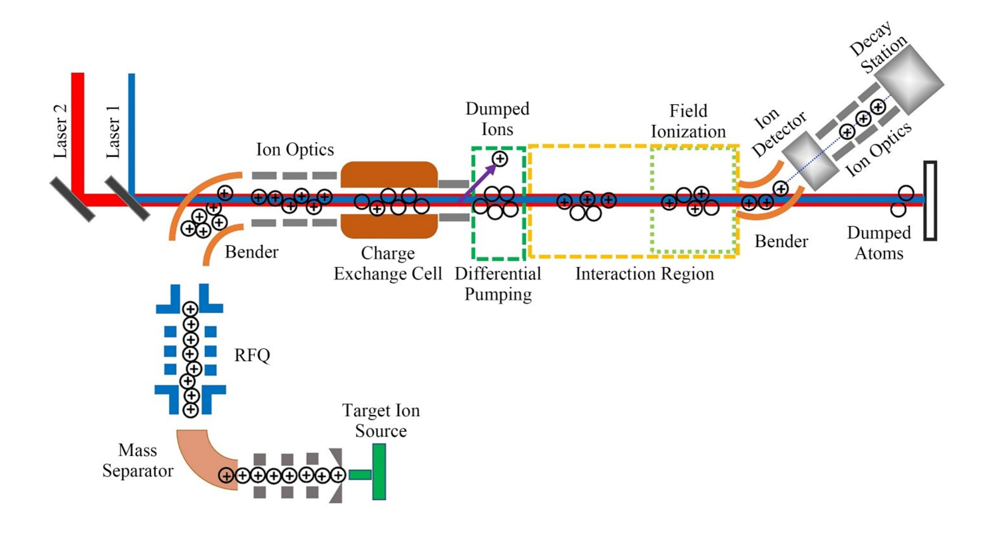


图5 CRIS实验装置示意图

Fig.5 Schematic of the CRIS experimental setup

2012年，CRIS的首个在线实验实现了对重质量核区缺中子的$^{202-205,218m,219,229,231}$Fr($Z=87$)同位素的磁矩和电荷半径测量，达到了1%的探测效率[61,63−64]。此实验的第一步共振激发采用的是线宽为1 GHz的脉冲蓝宝石激光，因此获得的谱线分辨率>1 GHz。2014年，CRIS团队采用普克尔盒调制窄带连续激光的方法产生窄带周期性激光，用此来共振激发Fr元素，实现了对Fr原子的高分辨(FWHM：20 MHz)超精细结构谱测量[65]。但由于经普克尔盒调制的脉冲激光功率较低，直接影响激光共振电离的效率。2016年，CRIS团队采用基于窄带连续激光的种子放大技术产生的高功率窄带脉冲激光首次实现了对中等质量核区产额仅有20 pps的丰中子^{78}Cu($Z=29$)核素的高分辨率(FWHM：75 MHz)和高灵敏度测量[18]。2018年，针对寿命短(110 ms)、产率低(200 pps)、伴随稳定核杂质高(10^6 pps)的轻质量核区^{52}K($Z=19$)核素，CRIS团队首次采用了β衰变标记的共线共振电离谱方法，实现了对极端丰中子核^{52}K的电荷半径测量[19]。β衰变标记的共线共振电离谱方法就是利用核素短寿命特征，采用探测目标核β衰变产物的方法代替探测离子，避开了大量稳定杂质核的干扰。2018年，CRIS团队完成了国际上首次针对含不稳定核的放射性分子(如RaF)的光谱测量，为在低能尺度下的基本对称性研究提供了新的机遇[20−21]。2019年，CRIS团队采用场电离技术实现对^{113,115}In($Z=49$)核素的高分辨测量，有望进一步提高CRIS方法的测量灵敏度[22]。

经过十余载的发展，CRIS技术渐趋成熟，已经成为国际领先的高分辨高灵敏度激光谱技术。目前，利用此技术已经在核素版图的各个质量区开展了针对不稳定核性质的实验测量，如轻核区的K[19,66]、Sc($Z=21$)[67]，中等质量区的Cu[18]、Ga($Z=31$)[68]，中重质量区的In[69]、Sn($Z=50$)[70]以及重核区的Ra($Z=88$)[71]、Fr[65]等，在不稳定核的奇特结构研究中发挥着重要作用。目前，密歇根州立大学的FRIB装置、芬兰于韦斯屈莱大学的IGISOL装置以

及国内的BRIF（Beijing Radioactive Ion-beam Facility）装置上都在发展CRIS技术，用于更远离稳定线原子核的性质和结构研究。

4 总结与展望

本文详细介绍了激光共振电离方法的基本原理，以及由此发展起来的针对不稳定核性质和结构研究的多种在线激光谱实验装置，如热腔在源共振电离谱，在线气室和在线喷注共振电离谱技术，辐射探测共振电离谱技术以及共线共振电离谱技术。

目前，国际范围内均在升级现有RIB装置或发展新一代RIB装置，以求产生更远离稳定线的滴线区核素。激光谱技术在这些RIB装置上快速发展和广泛部署。国内已有的BRIF[72]和正在建设的下一代大科学装置HIAF[9]上，此前还未发展用于不稳定核性质和结构研究的激光谱实验平台。近期国内团队自主研制的基于荧光探测的共线激光谱设备已在离线和在线实验中取得了重要进展，达到国际同类装置的先进水平[15,73–75]。为了在国内现有和未来的RIB装置上研究产额更低的不稳定核性质和结构，国内团队也正在发展高分辨高灵敏度的共线共振电离谱技术，目前也已经取得阶段性的重要进展，正在开展离线物理测试[76]。此技术将结合正在发展中的RFQ，应用于BRIF装置和未来的HIAF装置上，开展不稳定原子核基本性质和结构研究，以及针对放射性分子的谱学研究。

作者贡献声明 胡晗睿、杨晓菲负责文章整体构思、撰写；胡晗睿、郭洋帆负责图片绘制，文献整理。所有作者对文章进行检查与修改。

参考文献

1 叶沿林, 杨晓菲, 刘洋, 等. 与HIAF装置相关的放射性核束物理研究[J]. 中国科学: 物理 力学 天文学, 2020, **50**(11): 112003. DOI: 10.1360/SSPMA-2020-0282.
YE Yanlin, YANG Xiaofei, LIU Yang, *et al.* Radioactive ion beam physics related to HIAF[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2020, **50**(11): 112003. DOI: 10.1360/SSPMA-2020-0282.

2 Yang X F, Wang S J, Wilkins S G, *et al.* Laser spectroscopy for the study of exotic nuclei[J]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2023, **129**: 104005. DOI: 10.1016/j.ppnp.2022.104005.

3 Zhou L, Wang S M, Fang D Q, *et al.* Recent progress in two-proton radioactivity[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(8): 105. DOI: 10.1007/s41365-022-01091-1.

4 Liu Y, Ye Y L. Nuclear clustering in light neutron-rich nuclei[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**(12): 184. DOI: 10.1007/s41365-018-0522-x.

5 Borge M J G, Jonson B. ISOLDE past, present and future [J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2017, **44**(4): 044011. DOI: 10.1088/1361-6471/aa5f03.

6 Yano Y, Motobayashi T. Radioactive isotope beam factory at RIKEN (RIBF)[J]. Nuclear Physics News, 2007, **17**(4): 5 – 10. DOI: 10.1080/10506890701750368.

7 Glasmacher T, Sherrill B, Nazarewicz W, *et al.* Facility for rare isotope beams update for *Nuclear Physics News* [J]. Nuclear Physics News, 2017, **27**(2): 28 – 33. DOI: 10.1080/10619127.2017.1317176.

8 Eschke J. International facility for antiproton and ion research (FAIR) at GSI, Darmstadt[J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2005, **31**(6): S967 – S973. DOI: 10.1088/0954-3899/31/6/041.

9 Yang Y, Sun L T, Zhai Y H, *et al.* Heavy ion accelerator facility front end design and commissioning[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2019, **22**(11): 110101. DOI: 10.1103/physrevaccelbeams.22.110101.

10 刘永超, 白世伟, 杨晓菲. 用于核物理研究的精密激光谱技术的发展和展望[J]. 原子核物理评论, 2019, **36**(2): 161 – 169. DOI: 10.11804/NuclPhysRev.36.02.161.
LIU Yongchao, BAI Shiwei, YANG Xiaofei. Development and prospect of precision laser spectroscopy techniques for nuclear physics study[J]. Nuclear Physics Review, 2019, **36**(2): 161 – 169. DOI: 10.11804/NuclPhysRev.36.02.161.

11 Campbell P, Moore I D, Pearson M R. Laser spectroscopy for nuclear structure physics[J]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2016, **86**: 127 – 180. DOI: 10.1016/j.ppnp.2015.09.003.

12 白世伟, 杨晓菲. 基于不稳定核基本性质测量的原子核结构研究[J]. 原子核物理评论, 2018, **35**(4): 382 – 389. DOI: 10.11804/NuclPhysRev.35.04.382.
BAI Shiwei, YANG Xiaofei. Study of nuclear structure by the measurement of the ground state properties of unstable nuclei[J]. Nuclear Physics Review, 2018, **35**(4): 382 – 389. DOI: 10.11804/NuclPhysRev.35.04.382.

13 Yang X F, COLLAPS and CRIS collaboration. Precision laser spectroscopy technique for exotic radioactive beams at CERN-ISOLDE[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, **1024**: 012031. DOI: 10.1088/1742-6596/1024/1/012031.

14 Neugart R, Billowes J, Bissell M L, *et al*. Collinear laser spectroscopy at ISOLDE: new methods and highlights[J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2017, **44**(6): 064002. DOI: 10.1088/1361-6471/aa6642.

15 张鹏, 刘寅绅, 白世伟, 等. 用于不稳定原子核研究的共线激光谱仪研制进展[J]. 科学通报, 2023, **68**(9): 1054 – 1065. DOI: 10.1360/TB-2022-1116.

ZHANG Peng, LIU Yinshen, BAI Shiwei, *et al*. Progress on the development of the collinear laser spectroscopy setup for the study of unstable nuclei[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, **68**(9): 1054 – 1065. DOI: 10.1360/TB-2022-1116.

16 Fedosseev V, Chrysalidis K, Goodacre T D, *et al*. Ion beam production and study of radioactive isotopes with the laser ion source at ISOLDE[J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2017, **44**(8): 084006. DOI: 10.1088/1361-6471/aa78e0.

17 Duchemin C, Ramos J P, Stora T, *et al*. CERN-MEDICIS: a review since commissioning in 2017[J]. Frontiers in Medicine, 2021, **8**: 693682. DOI: 10.3389/fmed. 2021. 693682.

18 de Groote R P, Billowes J, Binnersley C L, *et al*. Dipole and quadrupole moments of $^{73-78}$Cu as a test of the robustness of the Z=28 shell closure near ^{78}Ni[J]. Physical Review C, 2017, **96**(4): 041302. DOI: 10.1103/physrevc. 96.041302.

19 Koszorús Á, Yang X F, Jiang W G, *et al*. Charge radii of exotic potassium isotopes challenge nuclear theory and the magic character of N = 32[J]. Nature Physics, 2021, **17**(4): 439 – 443. DOI: 10.1038/s41567-020-01136-5.

20 Garcia Ruiz R F, Berger R, Billowes J, *et al*. Spectroscopy of short-lived radioactive molecules[J]. Nature, 2020, **581**(7809): 396 – 400. DOI: 10.1038/s41586-020-2299-4.

21 Udrescu S M , Brinson A J , Ruiz R F G, *et al*. Isotope shifts of radium monofluoride molecules[J]. Physical Review Letters, 2021, **127**(3): 033001. DOI: 10.1103/physrevlett.127.033001.

22 Vernon A R, Ricketts C M, Billowes J, *et al*. Laser spectroscopy of indium Rydberg atom bunches by electric field ionization[J]. Scientific Reports, 2020, **10**: 12306. DOI: 10.1038/s41598-020-68218-5.

23 Naubereit P, Marín-Sáez J, Schneider F, *et al*. Resonance ionization spectroscopy of sodium Rydberg levels using difference frequency generation of high-repetition-rate pulsed Ti: sapphire lasers[J]. Physical Review A, 2016, **93**(5): 052518. DOI: 10.1103/physreva.93.052518.

24 Alkhazov G D, Batist L K, Bykov A A, *et al*. Application of a high efficiency selective laser ion source at the IRIS facility[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1991, **306**(1 – 2): 400 – 402. DOI: 10.1016/0168-9002(91)90348-T.

25 Mishin V I, Fedoseyev V N, Kluge H J, *et al*. Chemically selective laser ion-source for the CERN-ISOLDE on-line mass separator facility[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 1993, **73**(4): 550 – 560. DOI: 10.1016/0168-583X(93)95839-W.

26 Li R H, Mostamand M, Romans J, *et al*. Recent RILIS developments at the TRIUMF offline laser ion source test stand[J]. Hyperfine Interactions, 2020, **241**(1): 22. DOI: 10.1007/s10751-020-1694-4.

27 Marsh B A, Andel B, Andreyev A N, *et al*. New developments of the in-source spectroscopy method at RILIS/ISOLDE[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2013, **317**: 550 – 556. DOI: 10.1016/j.nimb.2013.07.070.

28 Marsh B A, Day Goodacre T, Sels S, *et al*. Characterization of the shape-staggering effect in mercury nuclei[J]. Nature Physics, 2018, **14**(12): 1163 – 1167. DOI: 10.1038/s41567-018-0292-8.

29 Reponen M, de Groote R P, Al Ayoubi L, *et al*. Evidence of a sudden increase in the nuclear size of proton-rich silver-96[J]. Nature Communications, 2021, **12**: 4596. DOI: 10.1038/s41467-021-24888-x.

30 Fedosseev V N, Kudryavtsev Y, Mishin V I. Resonance laser ionization of atoms for nuclear physics[J]. Physica Scripta, 2012, **85**(5): 058104. DOI: 10.1088/0031-8949/85/05/058104.

31 Alkhazov G D, Barzakh A E, Denisov V P, *et al*. A new highly efficient method of atomic spectroscopy for nuclides far from stability[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 1992, **69**(4): 517 – 520. DOI: 10.1016/0168-583X(92)95309-F.

32 De Witte H, Andreyev A N, Barré N, *et al*. Nuclear charge radii of neutron-deficient lead isotopes beyond N=104 midshell investigated by In-source laser spectroscopy[J]. Physical Review Letters, 2007, **98**(11): 112502. DOI: 10.1103/physrevlett.98.112502.

33 Kron T, Beerwerth R, Raeder S, *et al*. Hyperfine structure study of ^{97,98,99}Tc in a new laser ion source for high-resolution laser spectroscopy[J]. Physical Review C, 2020, **102**(3): 034307. DOI: 10.1103/physrevc. 102. 034307.

34 Studer D, Ulrich J, Braccini S, *et al*. High-resolution laser resonance ionization spectroscopy of $^{143-147}$Pm[J]. The European Physical Journal A, 2020, **56**(2): 69. DOI: 10.1140/epja/s10050-020-00061-8.

35 Blaum K, Geppert C, Kluge H J, *et al*. A novel scheme for a highly selective laser ion source[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2003, **204**: 331 – 335. DOI: 10.1016/S0168-583X(02)01942-0.

36 Fink D A, Richter S D, Blaum K, *et al*. On-line implementation and first operation of the Laser Ion Source and Trap at ISOLDE/CERN[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2015, **344**: 83 – 95. DOI: 10.1016/j.nimb.2014.12.007.

37 Van Duppen P, Dendooven P, Huyse M, *et al*. A laser ion source for on-line mass separation[J]. Hyperfine Interactions, 1992, **74**(1): 193 – 204. DOI: 10.1007/BF02398629.

38 Qamhieh Z N, Vandeweert E, Silverans R E, *et al*. Resonance ionization in a gas cell: a feasibility study for a laser ion source[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 1992, **70**(1 – 4): 131 – 136. DOI: 10.1016/0168-583X(92)95920-M.

39 Vermeeren L, Bijnens N, Huyse M, *et al*. An on-line laser ion source based on resonance photoionization in a gas cell[J]. Physical Review Letters, 1994, **73**(14): 1935 – 1938. DOI: 10.1103/physrevlett.73.1935.

40 Kudryavtsev Y, Andrzejewski J, Bijnens N, *et al*. Beams of short lived nuclei produced by selective laser ionization in a gas cell[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 1996, **114**(3 – 4): 350 – 365. DOI: 10.1016/0168-583X(96)00194-2.

41 Kudryavtsev Y, Facina M, Huyse M, *et al*. Beams of isotopes produced at LISOL by laser ionization after thermalization of energetic ions in a gas cell[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2003, **204**: 336 – 342. DOI: 10.1016/S0168-583X(02)01946-8.

42 Ferrer R, Barzakh A, Bastin B, *et al*. Towards high-resolution laser ionization spectroscopy of the heaviest elements in supersonic gas jet expansion[J]. Nature Communications, 2017, **8**: 14520. DOI: 10.1038/ncomms14520.

43 Pohjalainen I, Moore I D, Kron T, *et al*. In-gas-cell laser ionization studies of plutonium isotopes at IGISOL[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2016, **376**: 233 – 239. DOI: 10.1016/j.nimb.2016.02.019.

44 Choi H, Hirayama Y, Choi S, *et al*. In-gas-cell laser ionization spectroscopy of ^{194,196}Os isotopes by using a multireflection time-of-flight mass spectrograph[J]. Physical Review C, 2020, **102**(3): 034309. DOI: 10.1103/physrevc.102.034309.

45 Mukai M, Hirayama Y, Watanabe Y X, *et al*. In-gas-cell laser resonance ionization spectroscopy of ^{196,197,198}Ir[J]. Physical Review C, 2020, **102**(5): 054307. DOI: 10.1103/physrevc.102.054307.

46 Kudryavtsev Y, Ferrer R, Huyse M, *et al*. The in-gas-jet laser ion source: resonance ionization spectroscopy of radioactive atoms in supersonic gas jets[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2013, **297**: 7 – 22. DOI: 10.1016/j.nimb.2012.12.008.

47 Zadvornaya A, Creemers P, Dockx K, *et al*. Characterization of supersonic gas jets for high-resolution laser ionization spectroscopy of heavy elements[J]. Physical Review X, 2018, **8**(4): 041008. DOI: 10.1103/physrevx.8.041008.

48 Romans J, Ajayakumar A, Authier M, *et al*. First offline results from the S^3 low-energy branch[J]. Atoms, 2022, **10**(1): 21. DOI: 10.3390/atoms10010021.

49 Raeder S, Block M, Chhetri P, *et al*. A gas-jet apparatus for high-resolution laser spectroscopy on the heaviest elements at SHIP[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2020, **463**: 272 – 276. DOI: 10.1016/j.nimb.2019.05.016.

50 Lautenschläger F, Chhetri P, Ackermann D, *et al*. Developments for resonance ionization laser spectroscopy of the heaviest elements at SHIP[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2016, **383**: 115 – 122. DOI: 10.1016/j.nimb.2016.06.001.

51 Lauth W, Backe H, Dahlinger M, *et al*. Resonance

ionization spectroscopy in a buffer gas cell with radioactive decay detection, demonstrated using ^{208}Tl[J]. Physical Review Letters, 1992, **68**(11): 1675 – 1678. DOI: 10.1103/physrevlett.68.1675.

52 Laatiaoui M, Lauth W, Backe H, *et al*. Atom-at-a-time laser resonance ionization spectroscopy of nobelium[J]. Nature, 2016, **538**(7626): 495 – 498. DOI: 10.1038/nature19345.

53 Raeder S, Ackermann D, Backe H, *et al*. Probing sizes and shapes of nobelium isotopes by laser spectroscopy[J]. Physical Review Letters, 2018, **120**(23): 232503. DOI: 10.1103/physrevlett.120.232503.

54 Chhetri P, Ackermann D, Backe H, *et al*. Precision measurement of the first ionization potential of nobelium [J]. Physical Review Letters, 2018, **120**(26): 263003. DOI: 10.1103/physrevlett.120.263003.

55 Block M, Laatiaoui M, Raeder S. Recent progress in laser spectroscopy of the actinides[J]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2021, **116**: 103834. DOI: 10.1016/j.ppnp.2020.103834.

56 Kudriavtsev Y A, Letokhov V S. Laser method of highly selective detection of rare radioactive isotopes through multistep photoionization of accelerated atoms[J]. Applied Physics B, 1982, **29**(3): 219 – 221. DOI: 10.1007/BF00688671.

57 Schulz C, Arnold E, Borchers W, *et al*. Resonance ionization spectroscopy on a fast atomic ytterbium beam [J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 1991, **24**(22): 4831 – 4844. DOI: 10.1088/0953-4075/24/22/020.

58 Nieminen A, Huikari J, Jokinen A, *et al*. Beam cooler for low-energy radioactive ions[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2001, **469**(2): 244 – 253. DOI: 10.1016/S0168-9002(00)00750-6.

59 Campbell P, Nieminen A, Billowes J, *et al*. First results from laser spectroscopy on bunched radioactive beams from the JYFL ion-beam cooler[J]. European Physics Journal A, 2002, **15**: 45 – 48. DOI: 10.1140/epja/i2001-10223-y.

60 Flanagan K T. Recent advances in laser spectroscopy at ISOLDE[J]. Acta Physica Polonica B, 2013, **44**(3): 627 – 636. DOI: 10.5506/aphyspolb.44.627.

61 Cocolios T E, Al Suradi H H, Billowes J, *et al*. The collinear resonance ionization spectroscopy (CRIS) experimental setup at CERN-ISOLDE[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2013, **317**: 565 – 569. DOI: 10.1016/j.nimb.2013.05.088.

62 Mané E, Billowes J, Blaum K, *et al*. An ion cooler-buncher for high-sensitivity collinear laser spectroscopy at ISOLDE[J]. The European Physical Journal A, 2009, **42** (3): 503 – 507. DOI: 10.1140/epja/i2009-10828-0.

63 Flanagan K T, Lynch K M, Billowes J, *et al*. Collinear resonance ionization spectroscopy of neutron-deficient francium isotopes[J]. Physical Review Letters, 2013, **111** (21): 212501. DOI: 10.1103/physrevlett.111.212501.

64 Budinčević I, Billowes J, Bissell M L, *et al*. Laser spectroscopy of francium isotopes at the borders of the region of reflection asymmetry[J]. Physical Review C, 2014, **90**: 014317. DOI: 10.1103/physrevc.90.014317.

65 de Groote R P, Budinčević I, Billowes J, *et al*. Use of a continuous wave laser and pockels cell for sensitive high-resolution collinear resonance ionization spectroscopy[J]. Physical Review Letters, 2015, **115**(13): 132501. DOI: 10.1103/physrevlett.115.132501.

66 Koszorús Á, Yang X F, Billowes J, *et al*. Precision measurements of the charge radii of potassium isotopes [J]. Physical Review C, 2019, **100**(3): 034304. DOI: 10.1103/physrevc.100.034304.

67 Bai S W, Koszorús Á, Hu B S, *et al*. Electromagnetic moments of scandium isotopes and $N=28$ isotones in the distinctive $0f_{7/2}$ orbit[J]. Physics Letters B, 2022, **829**: 137064. DOI: 10.1016/j.physletb.2022.137064.

68 Farooq-Smith G J, Vernon A R, Billowes J, *et al*. Probing the $_{31}$Ga ground-state properties in the region near Z=28 with high-resolution laser spectroscopy[J]. Physical Review C, 2017, **96**(4): 044324. DOI: 10.1103/physrevc.96.044324.

69 Vernon A R, Garcia Ruiz R F, Miyagi T, *et al*. Nuclear moments of indium isotopes reveal abrupt change at magic number 82[J]. Nature, 2022, **607**(7918): 260 – 265. DOI: 10.1038/s41586-022-04818-7.

70 Gustafsson F P, Ricketts C M, Reitsma M L, *et al*. Tin resonance-ionization schemes for atomic- and nuclear-structure studies[J]. Physical Review A, 2020, **102**(5): 052812. DOI: 10.1103/physreva.102.052812.

71 Lynch K M, Wilkins S G, Billowes J, *et al*. Laser-spectroscopy studies of the nuclear structure of neutron-rich radium[J]. Physical Review C, 2018, **97**(2): 024309. DOI: 10.1103/physrevc.97.024309.

72 Zhang T J, Cui B Q, Lv Y L. BRIF: from the first proton beam to RIB production[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2020, **463**: 123 – 127. DOI: 10.1016/j.nimb.2019.06.045.

73 Wang S J, Yang X F, Bai S W, *et al*. Construction and commissioning of the collinear laser spectroscopy system at BRIF[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, **1032**: 166622. DOI: 10.1016/j.nima.2022.166622.

74 Bai S W, Yang X F, Wang S J, *et al*. Commissioning of a high-resolution collinear laser spectroscopy apparatus with a laser ablation ion source[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(1): 9. DOI: 10.1007/s41365-022-00992-5.

75 Liu Y C, Yang X F, Bai S W, *et al*. Control and data acquisition system for collinear laser spectroscopy experiments[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34** (3): 38. DOI: 10.1007/s41365-023-01197-0.

76 Zhang P, Hu H R, Yang X F, *et al*. Progress in the development of a collinear resonance ionisation laser spectroscopy setup[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2023, **541**: 37 – 41. DOI: 10.1016/j.nimb.2023.04.020.